

по ним определяем  $\alpha_1 = \arctg \frac{x_K}{z_K}$ . Задаваясь новым значением

$\Delta \alpha_1 = \frac{\alpha_1 - \alpha_w}{2}$ , вычисляем новые значения  $x_K, z_K$ . Операцию повторяем до тех пор, пока  $\Delta \alpha_1$  не станет меньше наперед заданной величины.

Проверка сопряжения двух поверхностей осуществляется в два этапа. На первом находятся контактирующие точки с общими координатами на линии зацепления. На втором этапе определяются текущие углы зацепления. Если эти углы будут равными между собой, то сопряжение рабочих поверхностей соблюдается. Сопряжение достаточно проверить в нескольких точках на линии зацепления.

Что касается зацепления М.Л. Новикова, то это точечное зацепление требует сопряжения только в точках контакта (одна для зацепления с дозаполненным вариантом и две для дозаполненного).

Если профиль зуба инструмента для нарезания одного колеса задать в виде дуги окружности (рисунок 2)

$$x^2 + (y - r)^2 = r^2, \quad (4)$$

то условная линия зацепления, проходящая через полюс передачи,

$$(x - r/2)^2 + z^2 = (r/2)^2. \quad (5)$$

Если же профиль зуба инструмента задать смещенной дугой окружности (рисунок 2)

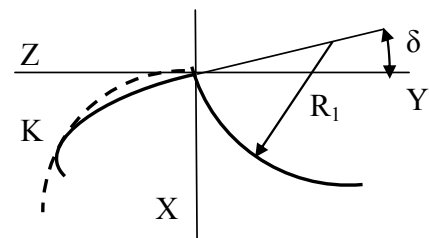


Рисунок 2 – Условная линия зацепления кругового контура со смещением и контактирование в зацеплении Новикова

$$(x - R \cos \delta)^2 + (y + R \sin \delta)^2 = R^2 \quad (6)$$

то условная линия зацепления

$$z = \frac{x \sqrt{R_1^2 - (x + R_1 \sin \delta)^2}}{x + R_1 \sin \delta}. \quad (7)$$

**Выводы.** Выше приведенные формулы и рекомендации позволяют построить сопряженные рабочие поверхности в зубчатом зацеплении и проверить их точность.

**Список литературы.** 1. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. – М.: Наука, 1968. – 584с. 2. Павлов А.И. Современная теория зубчатых зацеплений. – Харьков: ХНАДУ, 2005. – 100с.

Поступила в редколлегию 20.04.10

**С.І. ПАСТЕРНАК**, аспірант ІМВ ШУ, м. Штутгарт, Німеччина  
**Ю.М. ДАНИЛЬЧЕНКО**, д.т.н., проф., зав. каф. ПМ НТУУ "КПІ", м. Київ  
**М.Г. СТОРЧАК**, д.т.н., н.с. ІМВ ШУ  
**А.В. КРИВОШЕЯ**, к.т.н., с.н.с. ІНМ НАНУ, Київ

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТУРНОЇ ОБРОБКИ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ДИСКОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ

На базе четырехкоординатного обрабатывающего центра Hermle мод. UFW 1202 H с использованием ранее разработанной кинематической схемы формообразования проведено экспериментальное исследование процесса контурной обработки цилиндрических зубчатых колес дисковым инструментом. Определены величины составляющих силы резания и характер их изменения во время обработки эвольвентного зубчатого колеса. Определен и апробирован один из возможных путей оптимизации процесса обработки.

By using of the earlier designed kinematic scheme of shape forming on the base of 4-axis machining center Hermle UFW 1202 H an experimental research of spur gears' contour machining with disk-shaped tools was developed. Values of the cutting force components and their behavior by machining of evolvent teeth were defined. One of the possible ways for the cutting process' optimization was determined and tested.

Сучасні металорізальні верстати характеризуються високою ступінню рухомості виконавчих органів, що в поєднанні з високою точністю відпрацювання траєкторій їх рухів дозволяє здійснювати контурну обробку складнопрофільних деталей із застосуванням інструментів простої форми. Саме до таких деталей належать зубчасті колеса, але їх обробка зазвичай здійснюється за методом обкату на спеціально призначених для цього універсальних зубообробних верстатах із застосуванням інструментів складної форми. Це стосується лише зубчастих коліс із евольвентним профілем зубів. Виготовлення зубчастих коліс із профілем зубів, відмінним від евольвентного (циклоїдальним, синусоїдальним, профілем Новікова тощо), потребує застосування спеціального інструменту.

Застосування методу контурної обробки при виготовленні зубчастих коліс має ряд переваг, які насамперед полягають у підвищенні гнучкості самого процесу обробки та можливості його інтенсифікації за рахунок використання сучасних інструментальних матеріалів (мінералокераміки, полікристалічних надтвердих матеріалів), що робить дослідження в цьому напрямку актуальними.

Принципова можливість контурної обробки зубчастих коліс, як різновиду деталей з фасонним, періодично повторюваним профілем, не викликає сумніву, але способи реалізації такої обробки можуть бути різними [1]. На сучасних фрезерних верстатах така обробка здійснюється із використання кінцевих фрез [2], але її точність і продуктивність у значній мірі визначається жорсткістю, яка залежить від діаметру цих фрез, що обмежений шириною

западин зубчастого колеса. Перспективність контурної обробки зубчастих коліс дисковими фрезами вперше була доведена Когановим [3]. На даний час такий вид обробки використовується при виготовленні зубчастих коліс із циклоїдальним [4] і синусоїдальним [5] профілями, але інформація про силові характеристики самого процесу різання, яка необхідна для конструювання інструментів і обладнання призначених для його реалізації, його оптимізації і т. п., або є неповною, або ж взагалі відсутня.

Для використання цього способу для обробки зубчастих коліс з довільним, наперед заданим профілем на універсальному обладнанні розроблено узагальнену математичну модель кінематики формоутворення, розраховано траєкторії рухів його виконавчих органів, визначено характер і діапазон змін кінематичних характеристик (переміщень, швидкостей та прискорень) цих рухів, обґрунтовано економічну доцільність його впровадження при одиничному і дрібносерійному виробництві [6-10]. Наступним логічним кроком є встановлення силових характеристик процесу бконтурної обробки циліндричних зубчастих коліс дисковим інструментом і виявлення шляхів оптимізації процесу обробки для підвищення її рентабельності. Проведенню таких досліджень і присвячується ця стаття.

Метою цієї роботи є визначення величини складових сил різання і характеру їх зміни під час контурної обробки западин циліндричного зубчастого колеса дисковим інструментом. На основі цього буде встановлено шляхи для подальшої оптимізації процесу обробки.

Для реалізації цієї мети потрібно вирішити такі задачі:

1. Підготувати і провести експериментальне дослідження силових характеристик процесу контурної обробки циліндричних зубчастих коліс дисковим інструментом за раніше розробленою кінематичною схемою.
2. Провести аналіз результатів експерименту і встановити шляхи для подальшої оптимізації процесу обробки.

Дослідження процесу контурної обробки циліндричних зубчастих коліс дисковим інструментом було проведено в лабораторії Інституту металорізальних верстатів Штутгартського університету. Для цього було обрано раніше розроблену і теоретично досліджену кінематичну схему формоутворення (рисунки 1), яка шляхом комбінації зворотно-поступального руху  $y$  і неперервного обертального руху  $\varphi$  дискової фрези відносно заготовки забезпечує отримання на останній періодичних профілів (западин зубчастого колеса) [7-9]. Для забезпечення процесу різання, а також обробки періодичних профілів на всю ширину деталі у схемі передбачені відповідно обертний рух дискового інструмента відносно своєї осі  $\psi$  і його періодичний поступальний рух  $z$  відносно заготовки. Цю схему було реалізовано на чотирьохкоординатному оброблювальному центрі Hermle мод. UFW 1202 H з системою ЧПУ Heidenhain мод. TNC 426 (рисунки 2), для якого попередньо з допомогою раніше розробленої узагальненої математичної моделі кінематики формоутворення [7-9] була сгенерована програма ЧПУ.

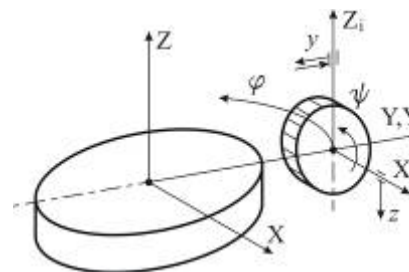


Рисунок 1 – Схема відносних рухів інструменту та деталі



Рисунок 2 – Експериментальний стенд на базі оброблювального центру

Обробка проводилась збірною дисковою відрізною фрезою фірми Alberg мод. 17210004, діаметром  $d_{fr} = 100$  мм, шириною  $b_{fr} = 4$  мм і числом зубів  $z_{fr} = 12$ , обладнаною поворотними пластинками SNCX1102 з твердого сплаву MP30 (рисунки 3). Заготовки діаметром  $d_z = 154$  мм і шириною  $b_z = 15$  мм виготовлялись зі сталі C45 твердістю HB 180 (рисунки 4).



Рисунок 3 – Дискова відрізна фреза



Рисунок 4 – Заготовка

Для вимірювання складових сили різання використовувався чотирьохкомпонентний динамометр фірми Kistler мод. 9272A. Заготовка закріплювалась на оправці динамометра, а він сам жорстко кріпився на поворотному столі верстата. Тарування динамометра проводилось безпосередньо на верстаті за допомогою еталонного одноканального динамометра фірми Kistler мод. 9331B. Під час експериментів сигнал від динамометра подавався на підсилювач фірми Kistler мод. 5015A10X0 і далі через розподільник фірми National Instrument мод. BNC-2110 на вимірювальну карту тієї ж фірми мод. PCI-6071. Результати вимірювання реєструвалися, оброблялися, і виводилися на ПЕОМ за допомогою спеціальної інформаційно-вимірювальної системи, яку було розроблено в програмному середовищі LabVIEW 7.1. Принципова схема вимірювання силових характеристик процесу різання зображена на рисунку 5.

Під час досліджень на вищезгаданих заготовках оброблялися западини

евольвентного циліндричного прямозубого зубчастого колеса модулем  $m = 7$  мм і числом зубів  $z = 20$  (рисунки 6 і 7). Обробка проводилася при частоті обертання шпинделя  $n = 600$  об/хв ( $v_z \approx 188$  м/хв), швидкості подачі уздовж профіля западини  $S_m = 200$  мм/хв і осьовій подачі  $S_o = 2$  мм/об і при цьому вимірювалися величини складових сили різання.



Рисунок 5 – Принципова схема вимірювання складових сили різання



Рисунок 6 – Контурна обробка зубчастого колеса дисковим інструментом



Рисунок 7 – Оброблене евольвентне зубчасте зачеплення

На рисунку 8 зображено розподіл експериментально виміряних радіальної  $P_x$  (а), осьової  $P_y$  (б) і тангенціальної  $P_z$  (в, зверху) складових сили різання уздовж оброблюваної западини (в, знизу). Величини усіх складових сили різання під час обробки западини біля ніжки зуба стрімко зростають, досягаючи свого піку, який у кілька разів перевищує їх середнє значення. Під час обробки западини ж біля голівки зуба вони є малими і змінюються в невеликому діапазоні. Цей пік сил викликає значні напруження в тілі інструменту (рисунки 10,а) і його деформації, а також призводить до погіршення умов різання.

Через це не лише знижується стійкість інструменту, але й зростає загроза поломки інструменту. Тому постає потреба у оптимізації процесу обробки шляхом вирівнювання величин складових сили різання.

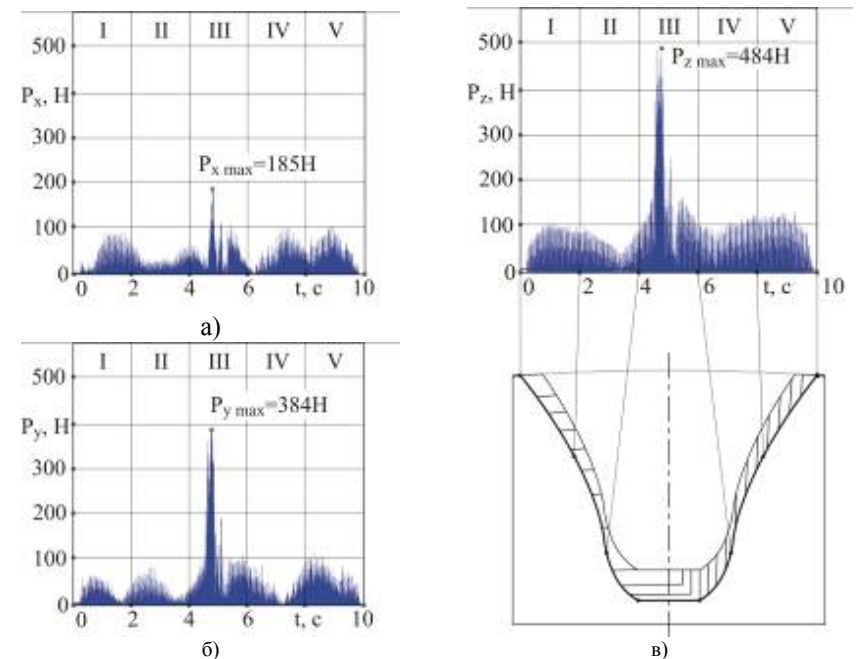


Рисунок 8 – Експериментально виміряні величини складових сили різання при обробці западини евольвентного зубчастого колеса

Однією з таких причин зміни складових сили різання є непостійна продуктивність зняття стружки, з якою, як відомо, тісно пов'язана сила різання [11]. Оскільки під час досліджень обробка западин зубчастого колеса проводилася зі сталюю подачею  $S_m = 200$  мм/хв, а ширина  $a$ , товщина  $b$ , довжина  $l_c$ , а отже і об'єм припуску  $V_c$  (матеріалу, який необхідно зняти) постійно змінювалися (рисунки 8,в, знизу), тому змінною була і продуктивність зняття стружки  $P_c = 0,01..160$  мм<sup>3</sup>/с:

$$P_c = \frac{V_c}{t} = \frac{a \cdot b \cdot l}{t} = S_m \cdot a \cdot l_c. \quad (1)$$

Далі було здійснено кілька спроб досягнути сталої продуктивності зняття стружки шляхом зміни під час обробки швидкості подачі. Діапазон зміни швидкості подачі визначався відповідно до залежності (1). Для постійної продуктивності  $P_c = 20$  мм<sup>3</sup>/с, при якій власне і вимірювалися величини складових сили різання, цей діапазон становить  $S_m = 20..4000$  мм/хв.

На рисунку 9 зображено характер зміни експериментально виміряних складових сили різання під час обробки западини евольвентного зубчастого колеса при постійній швидкості подачі (а) і при постійній продуктивності зняття стружки (б). Помітно, що внаслідок оптимізації величини складових сили різання частково вирівнялися, а їх максимальні значення знизилась у 2-4 рази при збереженні того ж часу обробки. Разом з тим стабілізувався процес різання, знизилася напруженість в тілі інструменту (рисунк 10, б) і його деформації. У результаті підвищилась стійкість інструменту і відповідно зросла рентабельність обробки.

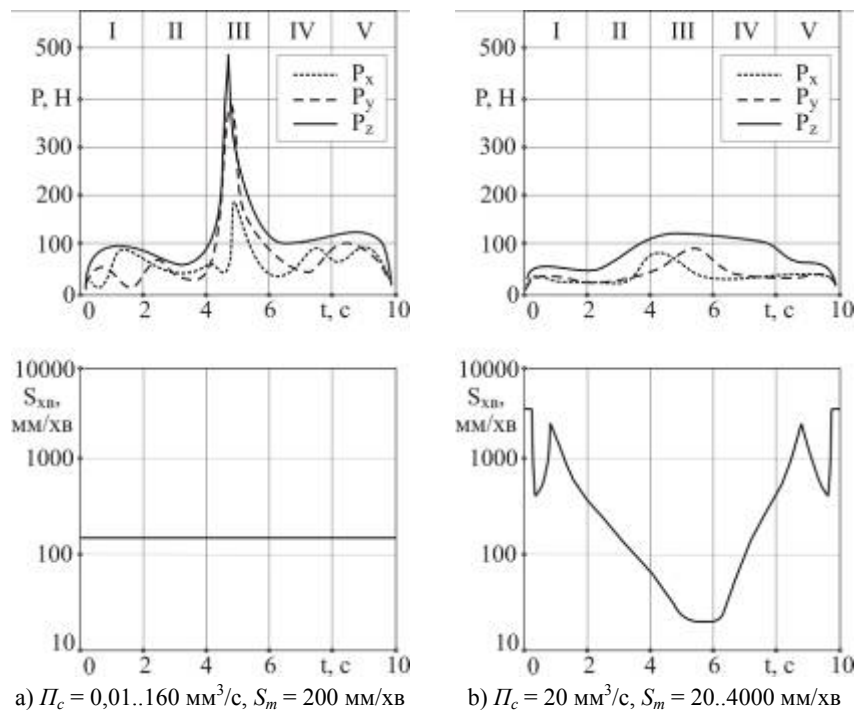


Рисунок 9 – Характер зміни складових сили різання до (а) і після (б) оптимізації шляхом зміни швидкості подачі

Однак, після проведеної оптимізації величини складових сили різання вирівнялися не повністю. Це зумовлено тим, що вони пов'язані з продуктивністю  $P_c$  нелінійно. На цей зв'язок впливають також коефіцієнти  $k_x$ ,  $k_y$  і  $k_z$ , які характеризують питому роботу по зняттю одиниці об'єму матеріалу, а також швидкості подачі у напрямку відповідних осей координат  $S_x$  і  $S_y$  ( $S_m = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$ ) та швидкість різання  $v_z$  [11]:

$$|P_x| = \frac{k_x \cdot P_c}{S_x}, |P_y| = \frac{k_y \cdot P_c}{S_y}, |P_z| = \frac{k_z \cdot P_c}{v_z}. \quad (2)$$

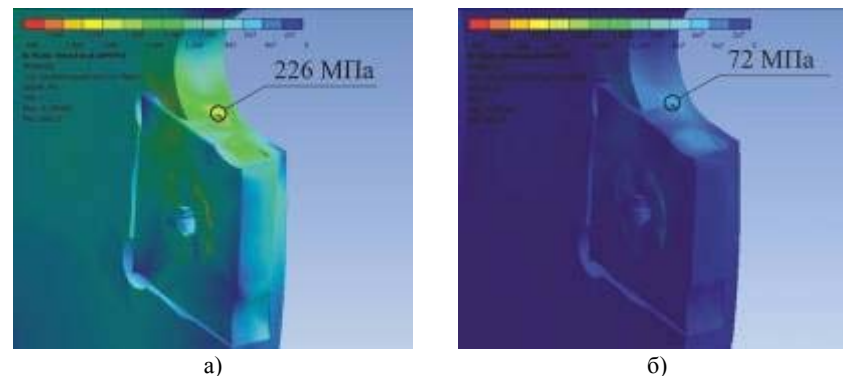


Рисунок 10 – Напруження по фон Мізесу, які виникають в тілі інструменту під дією сумарної сили різання, до (а) і після оптимізації (б)

Коефіцієнти  $k_x$ ,  $k_y$  і  $k_z$  залежать від багатьох геометричних і кінематичних параметрів процесу різання, а також матеріалу інструменту і заготовки, а тому у нашому випадку вони постійно змінюються. Отже, для проведення оптимізації і вирівнювання складових сили різання шляхом зміни швидкості подачі у повній мірі, необхідно точно знати значення цих коефіцієнтів для заданої кінематичної схеми формоутворення. А це потребує у свою чергу проведення цілого ряду більш ґрунтовних експериментальних досліджень, які власне і заплановано в подальшому провести.

### Висновки.

1. Спосіб контурної обробки зубчастих коліс дисковим інструментом по раніше розробленій кінематичній схемі формоутворення не лише теоретично, але й практично може бути реалізований на універсальному, доступному на ринку обладнанні. Однак, перед впровадженням у виробництво цей оброблювальний процес, для підвищення його рентабельності, потрібно оптимізувати.
2. Оптимізація процесу контурної обробки дисковим інструментом може здійснюватися шляхом призначення оптимальних режимів різання (наприклад, швидкості подачі). Але для того, щоб її здійснити необхідно провести ґрунтовні теоретичні і експериментальні дослідження процесу обробки, які б дозволили встановити емпіричні або аналітичні залежності між параметрами оптимізації (наприклад, швидкістю подачі) і її цільовими функціями (наприклад, стійкістю інструмента і рентабельністю обробки).
3. Визначені в результаті проведеного дослідження величини складових сил різання та характер їх зміни при обробці будуть в подальшому використані для вибору конструктивних параметрів експериментального стенду. Цей



стенд буде призначено для вище згаданих експериментальних досліджень процесу контурної обробки зубчастих коліс, а також інших деталей з періодичними і неперіодичними профілями дисковим інструментом.

**Список літератури:** 1. *Лаинев С.И., Юликов М.И.* Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ. – М.: Машиностроение, 1975. – 392с. 2. *Пантелов И.Н., Метев Х.Ц., Куманов И.В., Динев С.Д.* Нарязване на зъби на зъбни кола върху обработващи центри // Известия на ТУ-Габрово. – Т.30. – 2004. – С.121–134. 3. *Коганов И.А.* Прогрессивная обработка зубчатых профилей и фасонных поверхностей. – Тула: Приокское книжн. изд-во, 1970. – 180с. 4. Формообразование рабочего профиля сателлита трохойдной передачи // *Dr. Eng. Jankevich M., Ass. Dziatkovich V.*, National Academy of Science – Minsk, Belarus. Опубликовано в Интернеті: <http://www.gears.ru/transmis/zaprogramata/2.139.pdf>. 5. *Грицай І.Є., Благут Е.М., Яворський В.З.* Синусоїдальні зубчасті колеса та новий ефективний метод їх виготовлення // УІЦ "Наука. Техника. Технологія". – К., 2004. – С.47–50. 6. *Кривошея А.В., Данильченко Ю.М., Мельник В.Е., Благут Э.М.* Перспективы применения твердосплавных отрезных дисковых фрез при обработке цилиндрических зубчатых колес // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сборник. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2005. – Вып.69. – С.115–120. 7. *Данильченко Ю.М., Кривошея А.В., Пастернак С.І., Короткий С.В.* Кінематика формоутворення циліндричних зубчастих коліс з заданим профілем дисковим інструментом // Вестник НТУУ "ХПИ", сер. Машиностроение. – 2005. – №46. – С.104–108. 8. *Данильченко Ю.М., Кривошея А.В., Пастернак С.І.* Математичне моделювання законів руху дискового інструменту при обробці зубчастих коліс довільного профілю // Вестник НТУУ "ХПИ", сер. Машиностроение. – 2006. – №49. – С.104–108. 9. *Пастернак С.І., Данильченко Ю.М., Сторчак М.Г., Кривошея А.В.* Економічне обґрунтування методу контурної обробки деталей з періодичними профілями дисковим інструментом // Вісник НТУ "ХПИ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск "Проблеми механічного приводу". – Харків: НТУ "ХПИ", 2009. – №19. – С.118–126. 10. *Heisel, U.; Pasternak, S.; Storchak, M.; Stehle, T.*: Jede Verzahnung mit einem Werkzeug herstellbar. *dima*, 2009, Nr. 5, 44-45. 11. *Решетов Д.Н., Портман В.Т.* Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336с.

Надійшла до редколегії 30.04.10

УДК 621.833

**І.В. ПЕНЗОВА**, председатель правления ОАО "Агрегат", г. Славянск  
**Н.И. ПОНОМАРЕВ**, главный инженер ОАО "Агрегат"  
**В.М. ФЕЙ**, главный инженер АОЗТ "НИИ "Редуктор", г. Киев

## ОПЫТ ПРОИЗВОДСТВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МОТОР-РЕДУКТОРОВ С ПЕРЕДАЧАМИ НОВИКОВА НА ОАО "АГРЕГАТ"

Розглянуто досвід виробництва циліндричних мотор-редукторів з передачами Новикова на ВАТ "Агрегат".

Experience of production of cylindrical reducing motor-gears with the Novikov gears on JSC "Agregat" is considered.

С целью расширения номенклатуры и увеличения объема производства механических приводов на Славянском ОАО "Агрегат" в 2004г. была завер-

шена ОКР и начато производство цилиндрических двухступенчатых редукторов с передачами Новикова типоразмера 3МЦ2С-63Н по документации, разработанной АОЗТ "Научно-исследовательский институт "Редуктор" [1].

Мотор-редукторы (см. рисунок) имеют широкий диапазон передаваемых мощностей (0,25-3кВт), частот вращения выходного вала (28-400 об/мин), конструктивных исполнений по способу монтажа и современный технический уровень. Сравнительные данные мотор-редукторов 3МЦ2С-63Н с лучшими зарубежными образцами [2-4] приведен в таблице 1.



Рисунок – Мотор-редуктор 3МЦ2С-63Н

Таблица 1 – Сравнительные данные мотор-редукторов 3МЦ2С с передачами Новикова (твердость зубьев HRC 28...32) с лучшими зарубежными образцами с эвольвентными передачами высокой твердости (HRC 58...63)

Технические данные	3МЦ2С-63Н-56 НИИРедуктор, Украина, 2004-2009 [1]	C31290S4 Bonfiglioli Италия, 2008 [2]	R4790S4 SEW-EVRODRIVE Германия, 2008 [3]	SK22-90L4 NORD Германия, 2006 [4]
Мощность двигателя	1,1	1,1	1,1	1,1
Частота вращения выходного вала, об/мин	56	56	56	59
Крутящий момент на выходном валу, Н·м	160	132	147	139
Масса, кг	22,7	18-23	28	40
Габаритные размеры, L×B×H, мм	520×220×260	490×190×235	589×246×187	542×240×216
Удельная масса, кг/Н·м	0,14	0,14-0,17	0,19	0,286
Допускаемая радиальная консольная нагрузка на выходном валу, Н·м	3350	5180	4290	3440
Диаметр выходного вала, мм	28	30	30	30
Высота оси вращения, мм	140	110	115	125